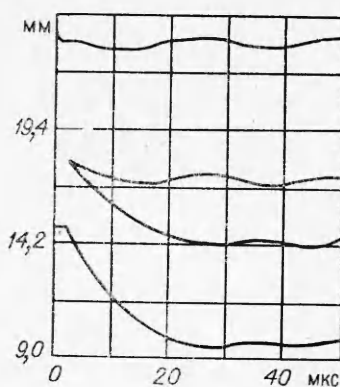


Ф и г. 2



Ф и г. 3

Кинетическая энергия оболочки достигает максимума через 4 мкс после начала движения, а через 35 мкс вся кинетическая энергия переходит в тепловую, практически равную полной энергии.

На фиг. 3 представлена r, t -диаграмма движения оболочки при нагружении зарядом ВВ толщиной 5 мм. Как видно из r, t -диаграммы, через 2,6 мкс на радиусе 18 мм образуется откол толщиной ~ 3 мм, который сходится к центру, утолщаясь до $\sim 4,7$ мм. Оставшаяся стенка оболочки практически не смещается, но колеблется вблизи начального положения. Повышение температуры в ударной волне также составляет ~ 35 К, однако конечная температура несколько ниже (~ 500 К) по сравнению с предыдущим опытом вследствие меньшей начальной скорости движения оболочки.

Таким образом, предложенная модель позволяет качественно, а по некоторым параметрам и количественно описать процесс схождения цилиндрической оболочки. Некоторые расхождения с экспериментом (по толщине откола и отсутствию деформации наружной границы оболочки), по-видимому, могут быть устранены соответствующим выбором счетных параметров.

Поступила 15 IV 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. Матюшкин Н. И., Тришин Ю. А. О некоторых эффектах, возникающих при взрывном обжатии вязкой цилиндрической оболочки. — ПМТФ, 1978, № 3.
2. Иванов А. Г., Минеев В. Н., Тюнькин Е. С. Импульсное схлопывание стальных цилиндрических оболочек. — Изв. АН СССР. МТТ, 1982, № 2.
3. Годунов С. К. Элементы механики сплошной среды. М.: Наука, 1978.
4. Годунов С. К., Козин Н. С., Роменский Е. И. Уравнение состояния упругой энергии металлов при нешаровом тензоре деформаций. — ПМТФ, 1974, № 2.
5. Годунов С. К., Денисенко В. В. и др. Применение релаксационной модели вязкоупругости при расчете одноосных однородных деформаций и уточнение интерполяционных формул максвелловской вязкости. — ПМТФ, 1979, № 5.
6. Иванов А. Г. Откол в квазиакустическом приближении. — ФГВ, 1975, № 3.

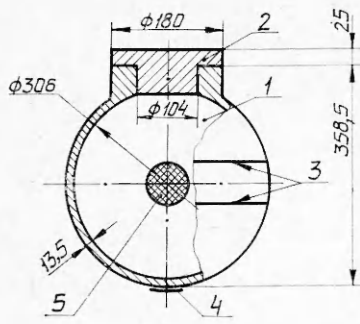
УДК 620.178.7

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОБОЛОЧЕК ВЗРЫВНЫХ КАМЕР

А. И. АБАКУМОВ, В. В. ЕГУНОВ, А. Г. ИВАНОВ,
А. А. УЧАЕВ, В. И. ЦЫПКИН, А. Т. ШИТОВ

(Москва)

В экспериментальных исследованиях по импульсному нагружению взрывных камер отмечается явление циклического повышения амплитуд деформаций с течением времени [1, 2]. Это явление связано с взаимодействием некоторых изгибных форм колебаний камеры, называемых критическими, с мембранными формами, что приводит к неустойчивому состоянию, в результате которого наблюдается циклический процесс перекачки энергии мембранных форм в изгибные. Возбуждение изгибных форм колебаний во взрывной камере происходит за счет различного рода конструктивных элементов (патрубки, опорные плиты для приборов, сварные швы и т. д.), а также несовершенств в виде отклонений геометрических и механических характеристик.



Ф и г. 1

В данной работе путем сравнения расчетных результатов с экспериментальными показано, что процесс циклического роста деформаций, наблюдаемый во взрывных камерах, может быть описан с помощью теории оболочек типа Тимошенко, учитывающей инерцию вращения и деформации поперечного сдвига.

1. Схема и результаты эксперимента. Исследовалась деформация замкнутой сферической оболочки из стали 35 с внутренним радиусом 153 мм и толщиной 13,5 мм, заполненной воздухом при нормальных условиях, при взрыве внутри нее заряда взрывчатого вещества (ВВ).

Схема эксперимента и основные размеры реальной оболочки приведены на фиг. 1. Оболочка жестко закреплялась пробкой 2 и подвешивалась за горловину через прокладку малой акустической жесткости и массы, исключавшей

влияние системы подвески на процесс динамического деформирования оболочки. Сферический заряд ВВ 5·ТГ-50/50 (50% — тротил, 50% — гексоген, плотность 1,65 г/см³) массой 80±0,5 г, располагаемый в центре оболочки, инициировался из центра. Возможное отклонение центра заряда от геометрического центра оболочки не превышало 2 мм. Деформация оболочки во времени $\epsilon(t)$ в области экватора и полюса регистрировалась методом тензометрии. В области экватора измерялась средняя осесимметричная деформация оболочки двумя кольцевыми проволочными датчиками 3 [3]. В области полюса регистрировалась локальная деформация на базе 20 мм двумя симметрично расположенными тензодатчиками 4. Центры датчиков отстояли от полюсной точки на 10 мм. В качестве регистраторов использовались осциллографы С1-18. Максимальная длительность процесса регистрации составляла 2 мс. Максимальная погрешность определения деформации не превышала 10%, а временных интервалов — 5%.

Результаты двух идентичных опытов приведены в таблице, где ϵ_1 и t_1 — соответственно деформация в первом максимуме и время ее достижения, отсчитываемое от начала деформации оболочки, ϵ_{\max} и t_{\max} — максимальная деформация и время ее достижения. Экспериментальные зависимости $\epsilon(t)$ в области экватора и полюса, полученные усреднением двух опытов, приведены на фиг. 2 (сплошные кривые).

Анализ результатов эксперимента показал следующее:

- 1) средняя кольцевая деформация оболочки в экваториальной области и локальная деформация в области полюса совпадают в течение первого полупериода колебаний;
- 2) максимальное значение средней кольцевой деформации в экваториальной области реализуется в течение первого полупериода колебаний (см. фиг. 2), а максимальное значение локальной деформации в полюсе достигается после нескольких периодов колебаний, т. е. наблюдается явление «раскачки», зарегистрированное в [1].

2. Методика и результаты расчетов. Задача по определению деформированного состояния оболочки решалась в два этапа.

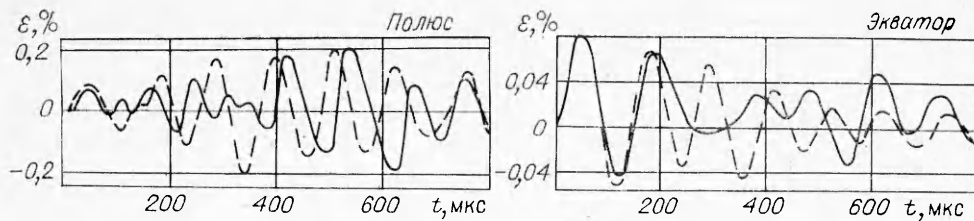
На первом этапе определялся профиль давления $P = P(t)$, действующего на внутреннюю поверхность оболочки. Зависимость $P(t)$ определялась путем численного решения на ЭВМ БЭСМ-6 системы одномерных уравнений газодинамики в сферической геометрии с граничным условием «жесткая стенка». Уравнение состояния продуктов взрыва было взято в виде [4], уравнение состояния воздуха взято из [5]. Использовалась разностная методика счета, описанная в [6, 7] (для расчета состояний на фронте ударной волны используются точные аналитические соотношения Гюгонио).

На втором этапе полученная расчетная зависимость $P = P(t)$ (фиг. 3) использовалась для описания динамического процесса упругопластического деформирования оболочки (модуль Юнга — 210 ГПа, динамический предел текучести — 0,5 ГПа). Определение напряженно-деформированного состояния оболочки производилось с помощью методики [8], в основу которой положены уравнения теории оболочек типа Тимошенко и физические соотношения дифференциальной теории пластичности с линейным кинематическим упрочнением.

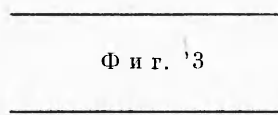
Уравнения движения, полученные из принципа возможных перемещений, имеют вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial s} [r (N_1 m + Q_n)] + P_z = \rho h \ddot{z},$$

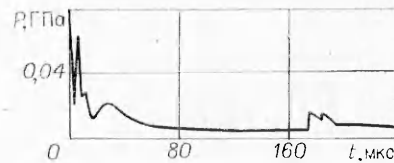
Номер опыта	$\epsilon_1, \%$		$t_1, \text{ мкс}$		$\epsilon_{\max}, \%$		$t_{\max}, \text{ мкс}$	
	Экватор	Полюс	Экватор	Полюс	Экватор	Полюс	Экватор	Полюс
1	0,09	0,08	55	52	0,09	0,23	55	560
2	0,08	0,08	50	50	0,08	0,22	50	540



Ф и г. 2



Ф и г. 3

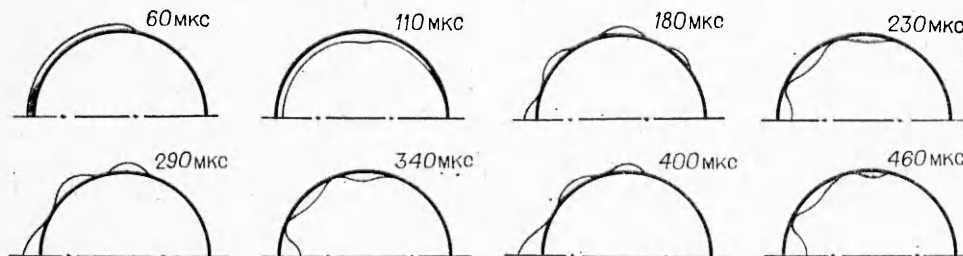


$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial s} [r (N_1 n - Qm)] - \frac{N_2}{r} + P_r = \rho h \ddot{\varphi}, \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial s} (r M_i) - \frac{M_2}{r} n - Q = \frac{\rho h^3}{12} \ddot{\varphi},$$

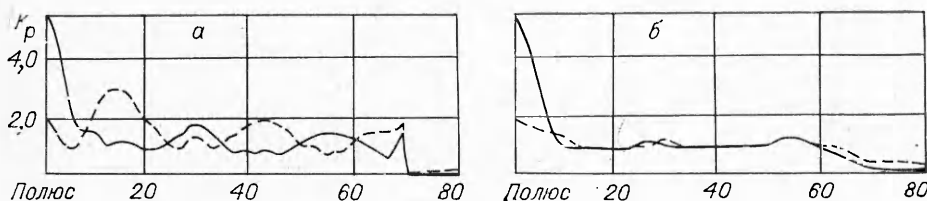
где N_i , M_i ($i = 1, 2$), Q — усилия, моменты и перерезывающая сила; h — толщина; ρ — плотность материала оболочки; P_z , P_r — проекции интенсивности внешней нагрузки на соответствующие оси координат (z, r); φ — угол поворота сечения; n, m — направляющие косинусы внешней нормали к поверхности оболочки.

Система уравнений движения при нулевых начальных условиях интегрировалась по времени методом конечных разностей по явной схеме «крест». Шаг по времени определялся из необходимого условия локальной устойчивости схемы $\Delta t \leq 0,95 \frac{\Delta s_{\min}}{c}$. В силу симметрии рассматривается половина оболочки, срединная поверхность которой вдоль меридиана разбивается рядом узлов ($j = 0, 100$). В методике [8] большие прогибы учитываются путем пошаговой перестройки геометрии оболочки.

Сравнивая экспериментальные и расчетные (штриховые кривые на фиг. 2) деформации в полюсной и экваториальной областях, следует отметить хорошее согласие как по величине амплитуды на первом периоде колебаний, так и по степени их циклического роста в течение всего рассматриваемого процесса. Некоторое отличие, связанное с изменением периода колебаний в эксперименте, объясняется использованием идеализированной расчетной схемы, в которой не учитываются реально существующие несовершенства, в частности отклонения от номинальных размеров и механических характеристик. Эти несовершенства, так же как и присоединенная масса, приводят в процессе колебаний к возбуждению спектра изгибных форм. Как показывают расчеты, для достаточно толстых оболочек ($h/R > 1/20$) влияние присоединенных масс намного



Ф и г. 4



Ф и г. 5

существенное влияние указанных выше несовершенств. Это позволяет при расчетах таких камер пренебречь учетом несовершенств и получить результаты, сравнимые с экспериментом.

Возбуждение изгибных форм на различные от начала деформации моменты времени в рассматриваемой оболочке показано на фиг. 4. Здесь виден процесс распространения изгибных форм меридиана полуоболочки и рост их амплитуд с течением времени (полюс — слева, начальное положение нанесено жирной линией).

Для удобства отношение максимально достигаемой величины деформации в конкретной точке (счетной ячейке) оболочки к амплитуде первого периода колебаний полюсной точки будем называть коэффициентом раскачки оболочки в этой точке K_p . На фиг. 5 приведено распределение K_p по меридиану полуоболочки на ее наружной (штриховые кривые) и внутренней поверхностях как для меридиональных (а), так и для кольцевых (б) деформаций. Из фиг. 5 видно существенное отличие в распределении K_p на наружной и внутренней поверхностях оболочки. При этом наибольшее значение достигается на внутренней поверхности оболочки вблизи полюса.

Сравнение результатов расчета с экспериментом по наиболее важным характеристикам реакции взрывных камер на действующую нагрузку позволяет заключить, что применяемая в расчетах модель теории оболочек типа Тимошенко, достаточно хорошо описывает как качественную, так и количественную сторону явления циклического роста амплитуд деформаций, происходящего в этих камерах при взрывном нагружении.

Величина циклического роста амплитуд деформаций наблюдается в локальных областях камеры и может достигать больших величин, поэтому рассматриваемое явление необходимо учитывать при проектировании и обработке взрывных камер.

Поступила 29 IV 1983

ЛИТЕРАТУРА

1. Бузуков А. А. Особенности поведения стенок взрывных камер под действием импульсной нагрузки. — ФГВ, 1976, № 4.
2. Корнев М. В., Адищев В. В. и др. Экспериментальное исследование и анализ колебаний оболочки взрывной камеры. — ФГВ, 1979, № 6.
3. Шитов А. Т., Мичнев В. Н. и др. Проволочный датчик для непрерывной регистрации больших деформаций при динамическом нагружении конструкций. — ФГВ, 1977, № 2.
4. Зубарев В. Н., Телегин Г. С., Жерноклетов М. В. Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ. — ПМТФ, 1969, № 4.
5. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965.
6. Куропатенко В. Ф. Метод построения разностных схем численного интегрирования уравнений газодинамики. — Изв. вузов. Математика, 1962, № 3(28).
7. Куропатенко В. Ф. О разностных схемах численного интегрирования уравнений газодинамики. — Тр. Мат. ин-та АН СССР, 1966, № 74.
8. Баженов В. Г., Ломунов В. К. Исследование упругопластического выпучивания оболочек вращения при ударном нагружении. — В кн.: Прикладные проблемы прочности и пластичности. Вып. 2 (Всесоюз. межвуз. сб. Горьк. ун-та), 1975.

УДК 539.375

О ПОЛЮС-ВЕРНЫХ ДИАГРАММАХ СЛОЖНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Ю. И. ФАДЕЕНКО

(Киев)

В кинетической теории разрушения зависимость долговечности твердого тела τ от приложенного напряжения σ описывается формулой, типичной для термоактивируемых процессов:

$$(1) \quad \tau = \tau_0 \exp \left[\frac{u - \gamma\sigma}{kT} \right],$$

где τ_0 — период определяющей моды тепловых колебаний; экспоненциальный множитель есть величина, обратная вероятности элементарного акта разрушения (преодоления активационного барьера) за один период колебаний; u — энергия активации; γ — активационный объем.

Цель данной работы — обратить внимание на то, что по виду экспериментальных зависимостей $\tau(\sigma)$ можно судить, какое количество элементарных механизмов разрушения давало существенный вклад в долговечность твердого тела. Для этого следует воспользоваться так называемой техникой полюс-верных диаграмм.

Из (1) следует, что семейство изотерм $\tau(\sigma)$ образует на плоскости $(\sigma, \ln \tau)$ верр прямолинейных лучей, исходящих из полюса с координатами $(u/\gamma, \ln \tau_0)$. Если одновременно работают два различных механизма разрушения, то на диаграмме присутствуют два различных верра изотерм, и результирующие изотермы будут иметь форму